

塩害を受けるコンクリート構造物の性能評価手法

清水建設(株) 正会員 前田 敏也*1

清水建設(株) 正会員 野口 恒久*1

清水建設(株) 正会員 村上かおり*1

1. はじめに

近年、コンクリート構造物に要求される性能が多様化するとともに、各種の劣化に対する耐久性が重要視されている。このような状況から、構造物の供用期間中に予想される種々の性能を照査する性能照査型の設計手法の確立が急がれており、平成11年版の土木学会コンクリート標準示方書[施工編]は、従来の仕様規定型から耐久性照査型に改訂されている。しかし、構造物の耐久性評価や劣化予測の手法は現在のところ確立されているとは言えず、今後の研究・開発が期待される。

一方、少子・高齢化社会の到来によって建設投資額は今後も減少が予想され、良質の社会資本を維持するために構造物に対する経済性を建設時の初期投資のみならず、供用期間中の維持管理費も含めたライフサイクルコスト(以下、LCCと称する)で評価しようとする動きがある。LCC評価のためには、供用期間中のどの時点でどの程度の劣化が生じ、それに対してどの程度の維持管理コストを要するかというような、劣化予測に基づいた定量的な評価が必要となる。

本報では、主として塩分環境下にあるコンクリート構造物について、塩害による顕著な劣化現象の一つである鉄筋腐食を対象とした性能評価手法について提案を行う。すなわち、鉄筋腐食を定量的に評価するとともに、塩化物イオンの浸透によって将来的な腐食の進行を予測し、さらに、その結果に基づいて供用期間中に要する維持管理コストを算定するものである。

2. 性能評価手法^{1),2)}

塩分環境下にあるコンクリート構造物の性能評価の流れを図-1に示す。評価は大きく「塩分データ部」、「劣化予測部」、「コスト評価部」の3つに分かれる。「塩分データ部」では塩害の劣化要因である塩化物イオンについて、表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数を設定する。ここで、拡散係数についてはコンクリートのW/Cや圧縮強度等から算定し(①、②)、また、表面塩化物イオン量については既往のデータに基づいて設定する(③)。ただし、既設構造物において塩化物イオンの分布に関する調査結果がある場合(④)には、調査結果から近似した値を設定する(⑤)。

「劣化予測部」では、設定された表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数からFickの拡散式により供用期間中の塩化物イオンの浸透予測を行う(⑦)。また、供用期間中に表面被覆等により塩化物イオンの侵入を遮断する場合には差分法により予測を行う。

次に、鉄筋の腐食はかぶりおよび塩化物イオン量に大きく影響されるが、同一のかぶりを有する鉄筋でも種々の条件の違いによって腐食の進行が異なるため、ここでは鉄筋の腐食発生を腐食確率で表す。すなわち、かぶりがある値以下の鉄筋の腐食確率は100%であり、このかぶりを腐食発生限界かぶりと定義して塩化物イオンによる鉄筋の腐食ひび割れ発生に関する寿命予測式により算出する(⑧、⑨)。一方、ある値以上のかぶりを有する鉄筋の腐食確率は0%であり、このかぶりを腐食非発生限界かぶりと定義し、鉄筋位置における塩化物イオン量が発錆限界(例えば 1.2kg/m^3)未満となるかぶり、あるいは過去の事例等から腐食の可能性が極めて低いかぶりとする(⑩、⑪)。また、腐食確率が0%から100%に移行する領域は累積正規分布と仮定する。腐食発生限界かぶりおよび腐食非発生限界かぶりは、塩化物イオンの浸透予測式により経時

キーワード：コンクリート構造物、塩害、性能評価、劣化予測、LCC

*1 〒105-8007 東京都港区芝浦 1-2-3 TEL：03-5441-0624 FAX：03-5441-0508

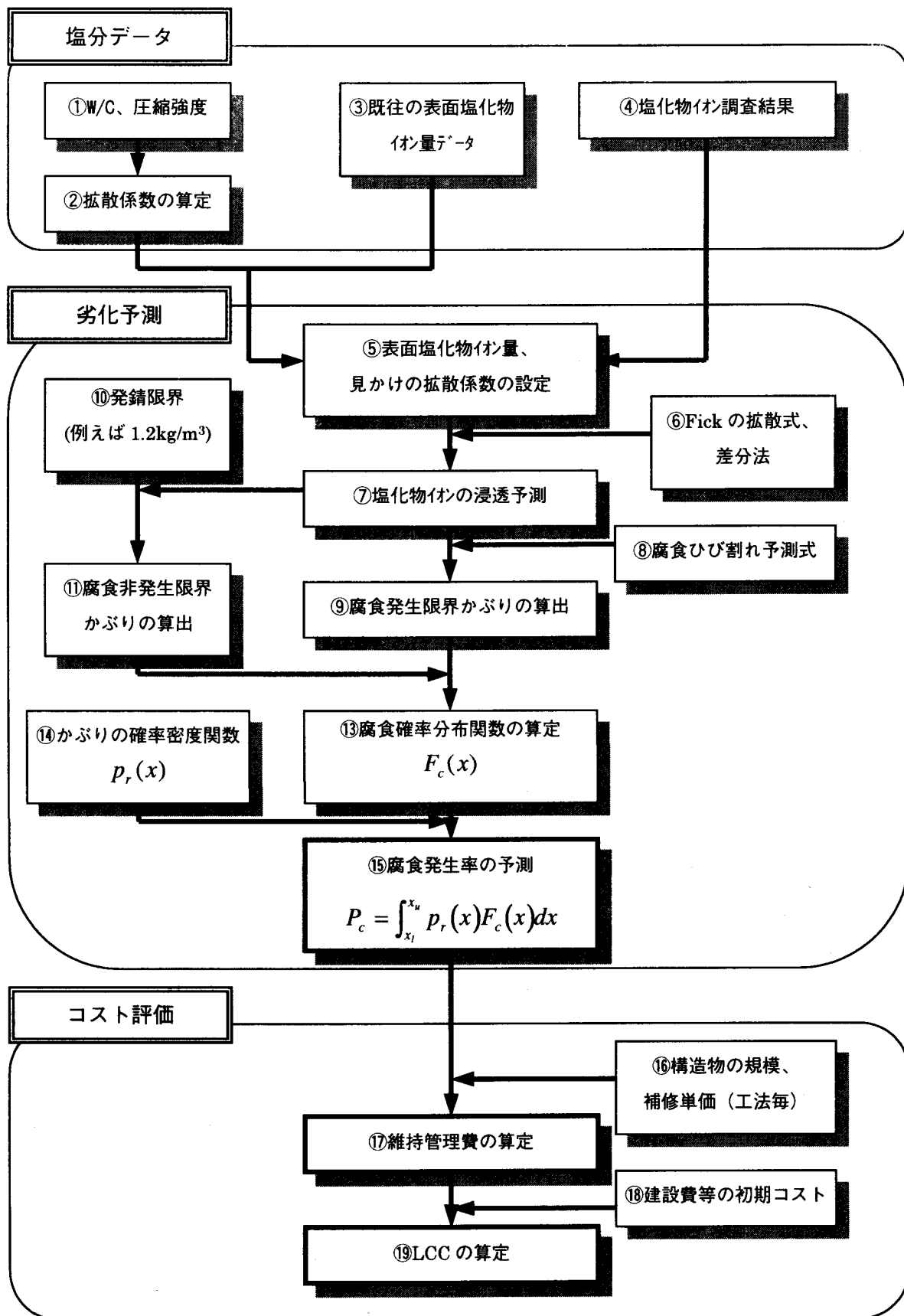


図-1 性能評価手法

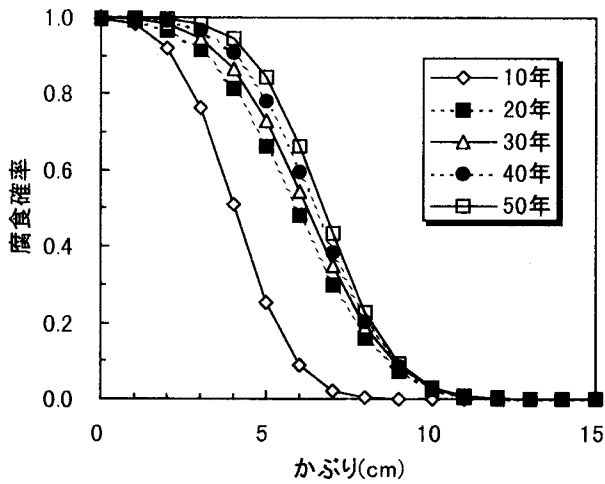


図-2 腐食確率の分布予測

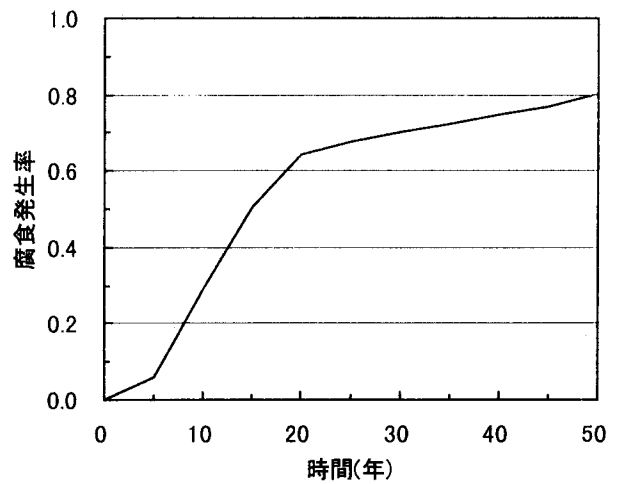


図-3 腐食発生率の予測

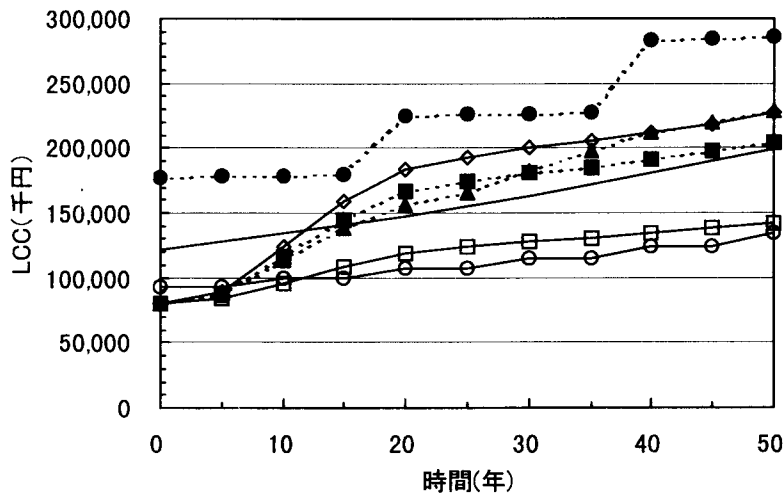
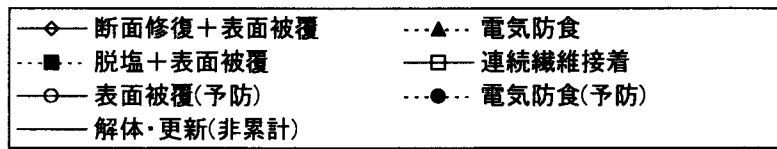


図-4 LCCの予測

的に算定できるため、供用期間中の腐食確率分布の変化が予測できる (13)。一方、かぶりは、施工上の理由等により、ある程度のばらつきを有するため、その分布を確率密度関数で表す (14)。鉄筋の腐食評価は、かぶりおよび腐食確率の分布から式(1)で求められる腐食発生率を指標として行う (15)。ただし、式の中のかぶりの上・下限値は、かぶりの確率密度関数において全体の95%が含まれる値とする。ここで、腐食発生率とは、構造物に配置されている全ての鉄筋のうち、腐食している鉄筋の割合を表すものである。腐食の進行は、塩化物イオンの浸透に伴う腐食発生率の変化により予測することができる。なお、本手法の妥当性は、いくつかの実構造物への適用により確認されている。

$$P_c = \int_{x_l}^{x_u} p_r(x) F_c(x) dx \quad (1)$$

ここに、 P_c ：腐食発生率、 $p_r(x)$ ：かぶりの確率密度関数、 $F_c(x)$ ：腐食確率の分布関数、 x ：かぶり、 x_u ：かぶりの上限値、 x_l ：かぶりの下限値

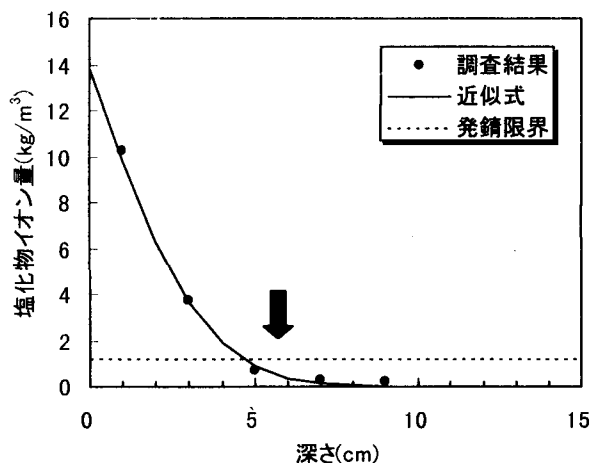


図-5 (a) 塩化物イオンの分布 (構造物 A)

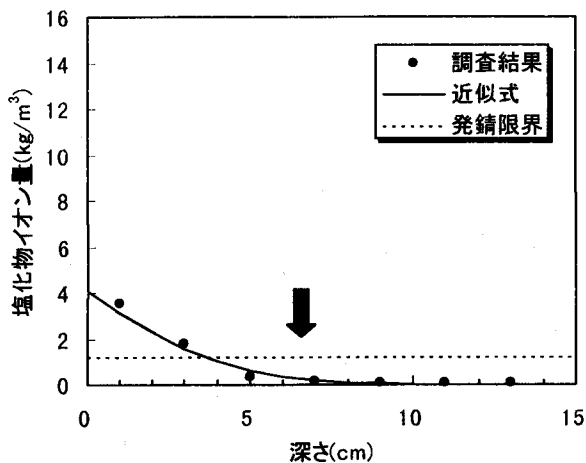


図-5 (b) 塩化物イオンの分布 (構造物 B)

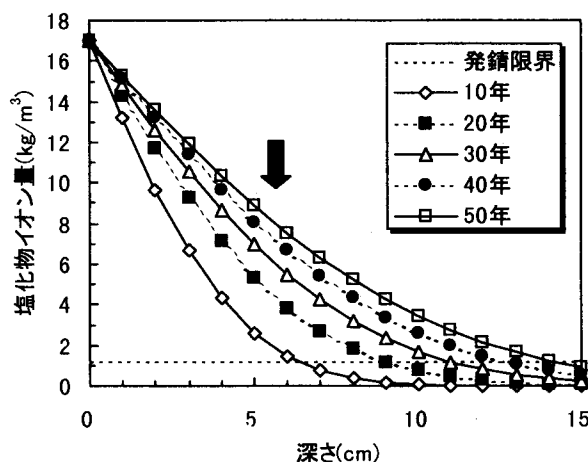


図-6 (a) 塩化物イオンの浸透予測 (構造物 A)

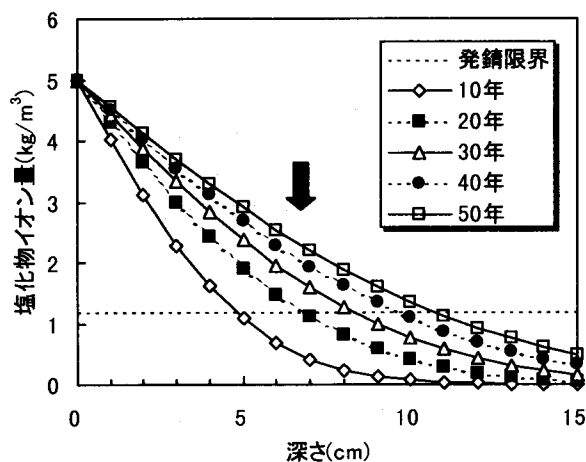


図-6 (b) 塩化物イオンの浸透予測 (構造物 B)

「コスト評価部」では、対象とする構造物のコンクリート表面積に腐食発生率を乗じた面積を補修数量として予測する。LCCは、予測された補修数量に単位面積当たりの補修費を乗じたコストに、建設費等の初期コスト、足場等の仮設費および経費等を加え、物価上昇を考慮して算定する(⑬～⑰)。補修工法としては、断面修復、表面被覆、電気防食、脱塩および連続繊維接着工法を対象とする。ここで、補修工法については材料や設備等の耐用年数を設定し、耐用年数を超えた場合には塗替えや取替え等の対策を行うことで、既に補修を行った箇所の再劣化はないものとする。

図-2～4に腐食確率の分布、腐食発生率およびLCCの予測結果のイメージをそれぞれ示す。

3. 評価事例

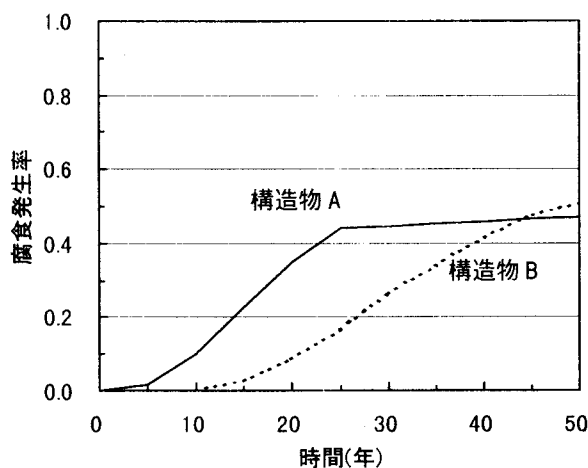
3.1 検討条件

海岸近くにあるコンクリート構造物に対する評価事例を以下に示す。構造物は、いずれも竣工後約10年を経過しており、調査時点では劣化は顕在化していなかった。調査は、塩化物イオンの分布についてのみ行った。鉄筋のかぶりは設計図面に示された設計かぶりを平均値とし、標準偏差は7.9mmとした³⁾。また、コンクリートの配合は設計基準強度から推定し、環境条件は理科年表を参考とした。

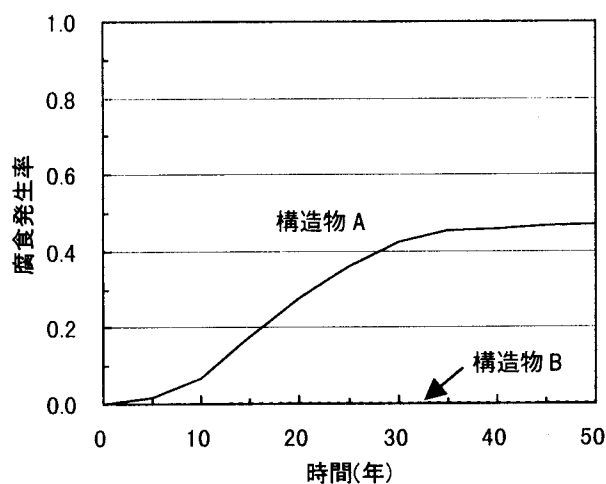
3.2 評価結果

(1) 塩化物イオンの分布

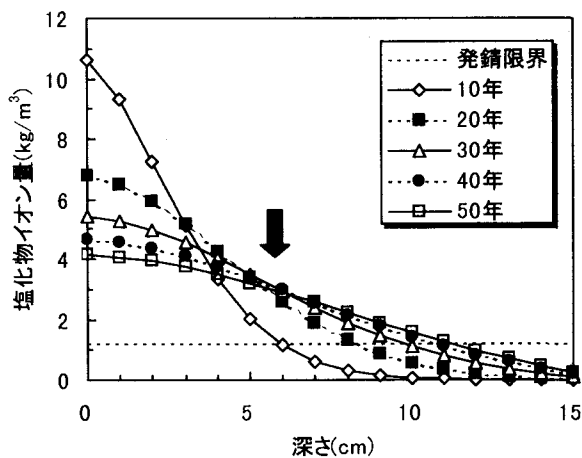
図-5に塩化物イオンの調査結果を示す。図中の矢印は鉄筋の設計かぶりである。調査時点では、鉄筋位置の塩化物イオン量は発錆限界である1.2 kg/m³未満であり、腐食の可能性は低い。また、調査結果から Fick



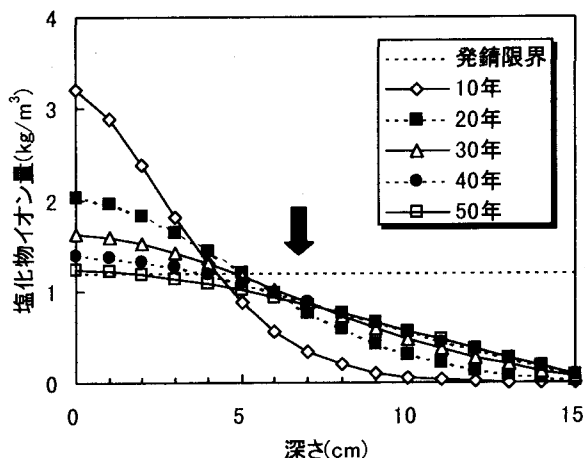
図一七 腐食発生率の予測



図一九 腐食発生率の予測 (表面被覆後)



図一八(a) 表面被覆後の浸透予測 (構造物A)



図一八(b) 表面被覆後の浸透予測 (構造物B)

の拡散式により同定した表面塩化物イオン量および見かけの拡散係数は、構造物Aで 13.25kg/m^3 および $1.97 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ 、構造物Bで 4.04kg/m^3 および $2.63 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ であり、構造物Aの方が厳しい塩分環境下にあるといえる。ただし、塩化物イオンの浸透予測を行う際には、表面塩化物イオン量について経時的な増加を考慮し、それぞれ 17.0kg/m^3 および 5.0kg/m^3 と設定した。これらのパラメータを用いた塩化物イオンの浸透予測結果を図一六に示す。これらの結果から、今後、いずれの構造物においても塩化物イオンの浸透によって鉄筋腐食の可能性が高くなることが予想される。

(2) 鉄筋腐食の評価

図一七に腐食発生率の予測結果を示す。いずれの構造物においても、腐食の進行速度に差はあるものの、竣工後50年では約50%の鉄筋が腐食することが予想される。

(3) 対策の検討

塩化物イオンの浸透予測結果から、いずれの構造物においても将来的な鉄筋腐食に対する対策が必要であると判定した。そこで、今後の劣化を未然に防ぐ目的で予防保全策として表面被覆工法の検討を行った。表面被覆は、調査時の翌年である竣工後8年目に行うものとし、それ以降は外部からの新たな塩化物イオンの供給は無いものとした。表面被覆後の塩化物イオンの浸透予測結果を図一八に示す。予測結果から、表面被覆により表層部の塩化物イオン量は減少するが、内部への拡散が進行し、構造物Aでは竣工後50年までに

表-1 補修工法

工 法	概 要	備 考
断面修復+表面被覆 (従来工法による 事後保全)	劣化が顕在化した箇所に対し、5年に1度の頻度で部分的に補修を行う。	表面被覆については 20年毎に上塗りの塗り替えを行う。
表面被覆工法 (予防保全)	劣化の進行を未然に防ぐため、竣工後8年目に構造物全体に対して対策を行う。	
脱塩+表面被覆工法 (予防保全)		20年毎に配管材や電源設備等の更新を行う。
電気防食工法 (予防保全)		

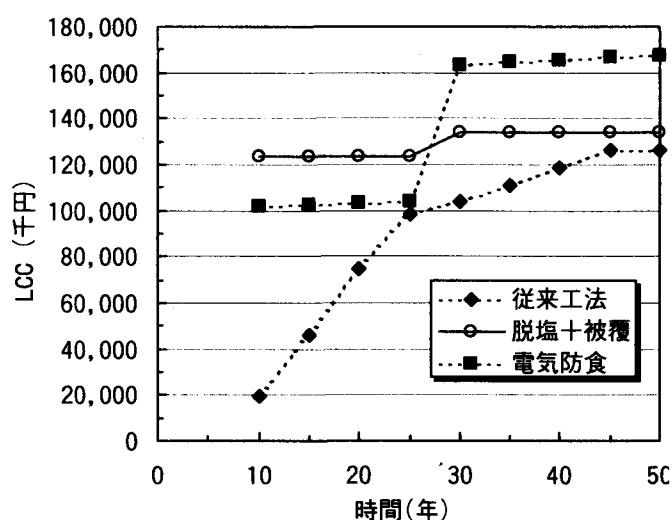


図-10(a) LCC 評価結果 (構造物 A)

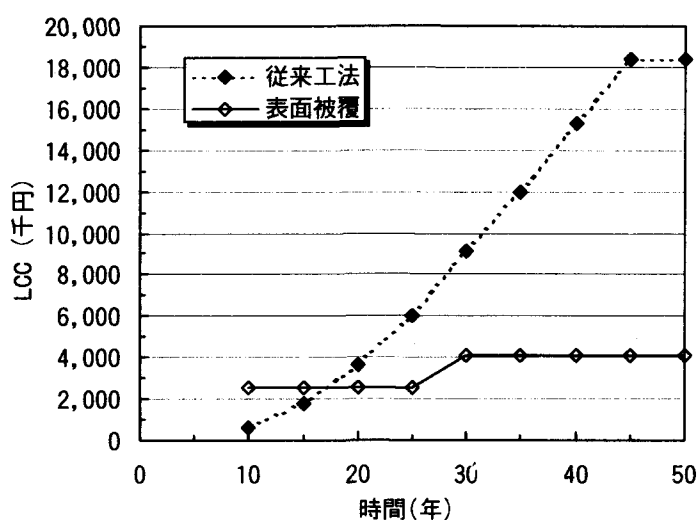


図-10(b) LCC 評価結果 (構造物 B)

鉄筋位置における塩化物イオン量が発錆限界を越えることがわかる。これに対し、表面塩化物イオン量が比較的少ない構造物 B では、鉄筋位置における塩化物イオン量が発錆限界未満であり、表面被覆の効果が期待できる。

また、表面被覆後の腐食発生率の予測結果を図-9に示す。これらの結果から、構造物 A では腐食の進行速度が遅くなるものの、最終的な腐食発生率は被覆を行わない場合と同じであり、表面被覆の効果が期待できないと考えられる。一方、構造物 B については腐食発生率がほぼ0%であり、早期に表面被覆を行うことによって今後の腐食進行を防止することが可能であると考えられる。

(4)LCC 評価

鉄筋腐食に関する劣化予測結果から、今後の補修に要する LCC 評価を行った。評価は、構造物の供用年数を 50 年として表-1に示す補修工法に関して行った。ここで、(断面修復+表面被覆)については、劣化の進行に応じて5年に1度の頻度で劣化箇所に対する部分補修を行うものとした。ただし、表面被覆については20年毎に上塗りの塗り替えを、また、電気防食については20年毎に配管材や電源設備等の更新を行うものとした。図-10に評価結果を示す。LCCの内訳は補修に関わる直接工事費、足場等の仮設費および諸経費である。補修対象面積は、構造物 A が 1,000 m²、構造物 B が 90 m²である。ここで、構造物 A については、表面被覆の効果が期待できないため、予防保全として(脱塩+表面被覆)および電気防食について比較を行った。一方、構造物 B については、表面被覆の効果が期待できることから、予防保全として表面被覆

について評価を行った。これらの結果から、構造物 A では従来工法と（脱塩+表面被覆）との LCC に大きな差はみられない。また、電気防食については 30 年目における設備更新のために最終的に LCC が高くなっている。したがって、今後の対策としては、予防的に（脱塩+表面被覆）を構造物全体に対して行うか、あるいは、従来通り（断面修復+表面被覆）を劣化が顕在化した箇所に対して部分的に随時行っていくのが適していると考えられる。一方、構造物 B については、30 年目に表面被覆の塗り替えを行うものの、予防保全を行った方が従来工法による事後保全に比べて LCC は大幅に安くなっている。したがって、早期に構造物全体に対する表面被覆を行うのが適していると考えられる。

4. まとめ

本報の主な内容をまとめると以下のようである。

- ①かぶりおよび腐食の発生を確率論的に取扱うことにより、腐食発生率を指標として鉄筋腐食に関する性能評価および劣化予測ができる。
- ②劣化予測結果に基づく LCC 評価によって最適な対策工法の選定や維持管理計画の立案が可能となる。

【参考文献】

- 1)前田敏也、周藤 功、田丸英夫、和賀秀悦、中山かおり：塩分環境下にあるコンクリート構造物の性能評価、構造物の診断に関するシンポジウム論文集、pp.241-248、1998.7
- 2)前田敏也、野口恒久、和賀秀悦：塩分環境下にあるコンクリート構造物の LCC 評価手法、土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集 第 6 部、pp.330-331、1999.9
- 3)建設省：コンクリート耐久性向上技術の開発報告書、1988.